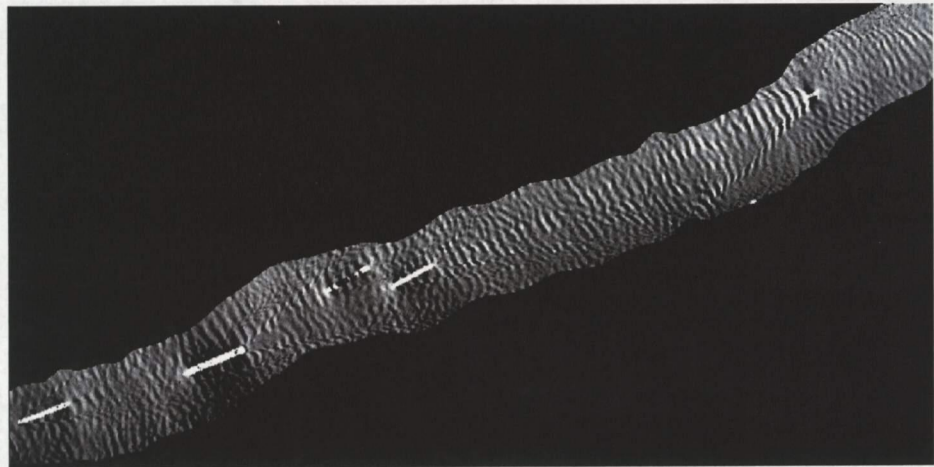


## Laseraltimetrie voor baggerwerk in de Waal

Verslag van de pilotvlucht november 1999 i.o.v. de Directie Oost-Nederland



Rijkswaterstaat  
Meetkundige Dienst - Delft  
Afdeling Remote Sensing & Fotogrammetrie



DI: 321792



# **Laseraltimetrie voor baggerwerk in de Waal**

**Verslag van de pilotvlucht november 1999 i.o.v. de Directie Oost-Nederland**

Rijkswaterstaat  
Meetkundige Dienst - Delft  
Afdeling Remote Sensing & Fotogrammetrie  
R.M. van Heerd

28 juni 2000







## Inhoud

<b>Inhoud .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Projectbeschrijving .....</b>	<b>4</b>
2.1 Inleiding .....	4
2.2 Doelstelling .....	4
2.3 Eindresultaten .....	4
2.4 Projectafbakening .....	4
<b>3 Beschrijving van de gegevens .....</b>	<b>5</b>
3.1 De laseraltimetrievlucht .....	5
3.1.1 Gestelde voorwaarden .....	5
3.1.2 Bijzonderheden omtrent de vlucht .....	5
3.2 Kwaliteit van de gegevens .....	5
3.2.1 Validatie met referentiegegevens .....	5
3.2.2 Visueel waarneembare verstoringen .....	6
3.3 Beschrijving eindproducten .....	7
3.3.1 Ruwe laseraltimetriegegevens .....	7
3.3.2 Afgeleide Digitale Hoogte Modellen .....	7
3.3.3 Verhanglijn .....	11
<b>4 Conclusies, aanbevelingen en discussie .....</b>	<b>12</b>
4.1 Betreffende kwaliteit .....	12
4.2 Betreffende bepalen momentane verhanglijn Waal .....	12
4.3 Betreffende aard van het gebruikte lasersysteem .....	12
4.4 Betreffende overige gebruiksmogelijkheden in het rivierengebied .....	12







## 2 Projectbeschrijving

### 2.1 Inleiding

Voor het vaststellen van het Bagger Referentie Vlak 2000.0 voor de Waal zijn in november 1999 gelijktijdig waterstand- en afvoermetingen op deze rivier uitgevoerd. Hierbij zijn metingen verricht met zowel bekende als nieuwe methodieken. Waterstanden zijn bepaald door middel van vaartuigmetingen, (MSW)peilstations en laseraltimetrie vanuit de lucht. De bodemligging is bepaald met behulp van multi-beam metingen en de rivierafvoer door middel van akoestische debietmeters (ADCP).

In dit rapport wordt beknopt verslag gedaan van de uitgevoerde laseraltimetriemetingen. Het beoogde lezerspubliek zijn de gebruikers van de gegevens die nog relatief onbekend zijn met de laseraltimetrie methode. De toepassing van deze techniek is hier redelijk uniek, omdat die tot dan toe vrijwel alleen is toegepast voor het bepalen van maaiveldhoogten (bijv. voor het Actueel Hoogtebestand Nederland). Daarom zal behalve een beschrijving van de aard en kwaliteit van de laserwaarnemingen op het water ook kort aandacht worden geschonken aan de operationele aspecten en eventuele aanverwante toepassingsmogelijkheden van deze relatief jonge meettechniek.

De afdeling Rivieren van het RIZA vergelijkt de laseraltimetriemetingen met de andere (in situ) metingen en zal de Directie Oost-Nederland, verantwoordelijk voor het baggerwerk op de Waal en in deze opdrachtgever, adviseren over de inzet van deze meetmethode voor het bepalen van bovengenoemde referentievlakken.

Gezien het innovatieve karakter heeft het Programmabureau Meetstrategie 2000+ het project financieel gesteund.

### 2.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is de volgende:

*Bepalen, middels een proefvlucht, in hoeverre laseraltimetrie kan worden gebruikt voor het bepalen van het momentane verhang, eventueel ook dwarsverhang, van de rivier de Waal, ten behoeve van baggerwerkzaamheden*

De volgende vragen zijn hierbij van belang en dienen te worden beantwoord:

- Wat is de precisie van de laseraltimetriemetingen, in vergelijking met in situ metingen?
- Is laseraltimetrie geschikt als operationele meettechniek voor het meten van waterstanden/verhanglijnen, ook voor grotere delen van het rivierengebied?

### 2.3 Eindresultaten

Dit project levert de volgende eindresultaten op:

- De 'ruwe' laseraltimetriemetingen, geschikt voor verdere analyse en het afleiden van specifieke hoogteproducten, zoals bijvoorbeeld een globale verhanglijn (dit project) of het kilometer-gemiddelde verhang (door RIZA). De mate van oorspronkelijkheid van deze metingen zal in hoofdstuk 3 worden toegelicht
- Digitale Hoogte Modellen (DHM), verkregen door middel van interpolatie van de lasermetingen naar een regelmatig grid. Vooral geschikt voor het visualiseren en beoordelen van de gegevens op ruimtelijke patronen.
- Verhanglijn over de as van de rivier, verkregen uit de 'ruwe' laseraltimetriemetingen.
- Deze rapportage met beschrijving van aard en kwaliteit van de laseraltimetriemetingen

### 2.4 Projectafbakening

Dit project omvat alleen het inwinnen, verwerken en beoordelen van laseraltimetriegegevens en terrestrische metingen die nodig zijn voor controle van deze gegevens. Eventuele in situ metingen van waterstand, afvoer en bodemligging met vaartuigen en peilmeetstations en een vergaande analyse van de verschillen tussen diverse meetresultaten valt buiten dit project. Hiervoor wordt verwezen naar de studie van het RIZA, getiteld 'Het Bagger Referentie Vlak 2000.0 voor de Waal' (N. Douben, 2000 (in voorbereiding)).







### 3 Beschrijving van de gegevens

#### 3.1 De laseraltimetrievlucht

##### 3.1.1 Gestelde voorwaarden

De laseraltimetriegegevens zijn onder de volgende, door de opdrachtgever gestelde, voorwaarden ingewonnen:

- Een precisie van 10 cm. Dit is 2 maal de waarde van de standaardafwijking t.o.v. referentievelden, zoals bij toetsing van laseraltimetriemetingen op het land plaats vindt. De aanvankelijk gewenste precisie in de zelfde orde als de peilmeetstations van rond de 5 cm kon niet door de aannemers worden geaccepteerd.
- De vlucht is uitgevoerd tijdens een laag water periode in najaar van 1999 (grootste kans in oktober).
- De laseraltimetriegegevens zijn voorzien van een tijdregistratie, zodat deze kunnen worden gekoppeld met de in situ metingen.
- De metingen hebben een minimale meetdichtheid van 1 punt/4 m<sup>2</sup> op as van de rivier.
- De metingen zijn op één dag uitgevoerd (momentopname) over de as van de rivier de Waal tussen Gorinchem en Emmerich (105 km).
- De strook met laserwaarnemingen is rond de 200 meter rond de as van de rivier. Uit ervaring is gebleken dat op wateroppervlakken de strook met teruggekaatste lasersignalen smaller is dan op land, ongeveer 20-40% van de totale strookbreedte, als gevolg van reflectie en absorptie. De hier behaalde breedte bleek de maximaal haalbare.
- Op enkele plaatsen langs de rivier zijn delen van de oever met kribben ingemeten om te controleren of de vorm goed beschreven kan worden m.b.v. deze techniek. Inventarisatie van oevers en objecten zou een mogelijke toepassing van deze hoogtegegevens kunnen zijn.
- Op enkele plaatsen is een gedeelte van de oever met harde topografie meegenomen in de vlucht, zodat de laseraltimetriehoogten met terrestrische controlemetingen gecontroleerd kunnen worden
- De vlucht is uitgevoerd bij rustig weer. Dit laatste om te hoge golven op het water te voorkomen.

Een gedeelte van de vaartuigmetingen heeft niet gelijktijdig met de laservlucht plaatsgevonden, zoals aanvankelijk de bedoeling was, maar een dag later. De oorzaak hiervoor is miscommunicatie tussen lucht- en vaarploeg en de coördinatie bij de Meetkundige Dienst.

##### 3.1.2 Bijzonderheden omtrent de vlucht

De vlucht is uitgevoerd met het laseraltimetriesysteem van de Duitse firma Toposys GmbH., gemonteerd onder een helikopter. Er is gekozen voor een helikopter vanwege de grotere wendbaarheid en daarmee de mogelijkheid de as van de rivier beter te kunnen volgen. Op eigen initiatief is besloten zowel van Emmerich naar Gorinchem metingen uit te voeren als op de terugweg naar Emmerich. Hierbij is op de heenvlucht gevlogen volgens een door de DON aangeleverde as van de rivier (vereenvoudigd naar enkele honderden punten) en op de terugvlucht door navigatie op zicht door de helikopterpiloot. In het geval van navigatie 'met de hand' bleek het beter de as van de rivier te volgen, mede door beperkingen van de navigatieapparatuur in de helikopter waarmee de route was vastgelegd.

Tabel 1 In onderstaande tabel staat een samenvatting van de vlucht.

vlucht	datum	begintijd	eindtijd	bijzonderheden
heen	11-11-1999	12:05	12:46	vertrek
		12:46	13:58	referentiegebied Emmerich
terug	11-11-1999	13:59	14:04	referentiegebied Gorinchem
		14:06	14:12	referentiegebied Vuren
		14:13	14:16	referentiegebied Herwijnen
		14:16	14:35	referentiegebied Druten
		14:35	15:20	aankomst

#### 3.2 Kwaliteit van de gegevens

##### 3.2.1 Validatie met referentiegegevens

Er zijn referentiemetingen uitgevoerd in Nederland door de firma Grontmij op vlakken delen op dijken en asfalt op vier locaties langs het traject. Vergelijking met laseraltimetriemetingen leverde op dat de gemiddelde fout beneden de 2 cm lag met een standaarddeviatie beneden de 9 cm. De metingen zijn hiermee op land gevalideerd



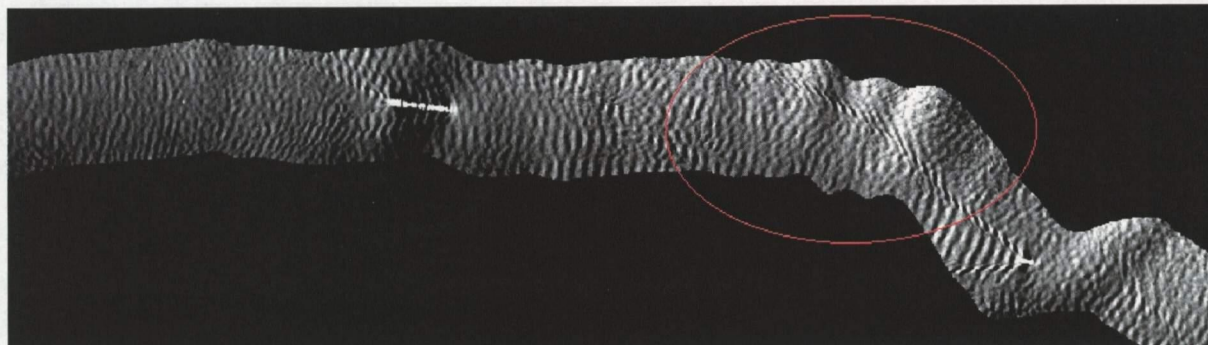




en goed bevonden. Een meer geavanceerde kwantitatieve toets op de kwaliteit, zoals die normaal wordt uitgevoerd door gebruik te maken van dubbele metingen in de langsoverlap van vluchtstroken, kan hier niet worden toegepast, omdat de opname één lange strook bevat.

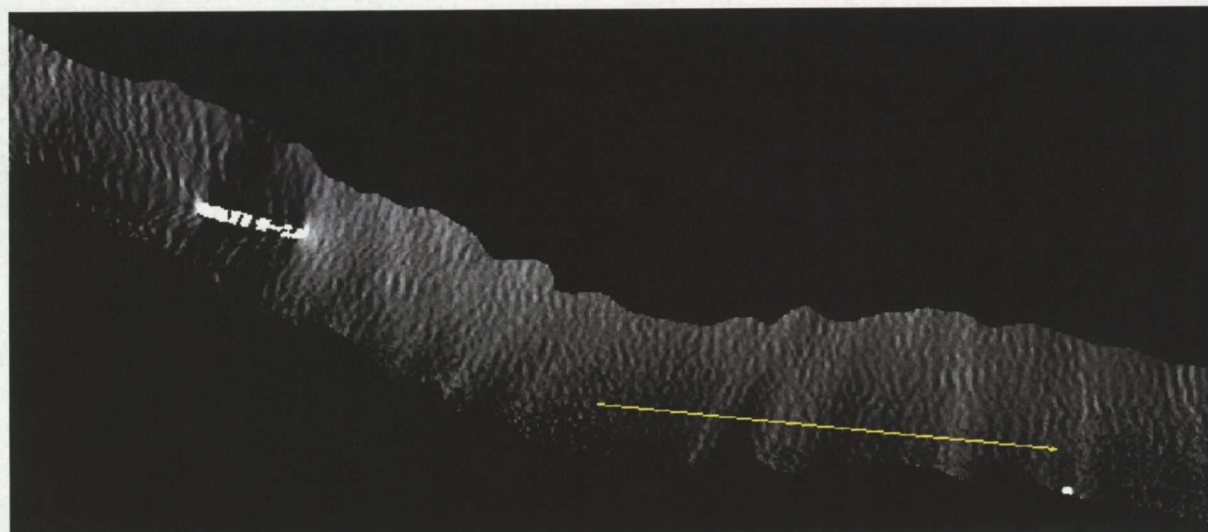
### 3.2.2 Visueel waarneembare verstoringen

Ervaring met laseraltimetriegegevens heeft uitgewezen dat voor de kwaliteitscontrole niet alleen kan worden volstaan met een steekproefsgewijze validatie met behulp van referentiemetingen, zoals hiervoor beschreven. Ook bij visuele inspectie van de DHM's van de heen en terugvlucht kwamen patronen aan het licht die op verstoringen duiden. In de onderstaande figuur is een golfpatroon dwars op de vliegrichting waarneembaar met een grotere golflengte dan voor wind- of boeggolven redelijk lijkt. Dit patroon is met name in de bochten evident, maar is ook op de rechte stukken zichtbaar.



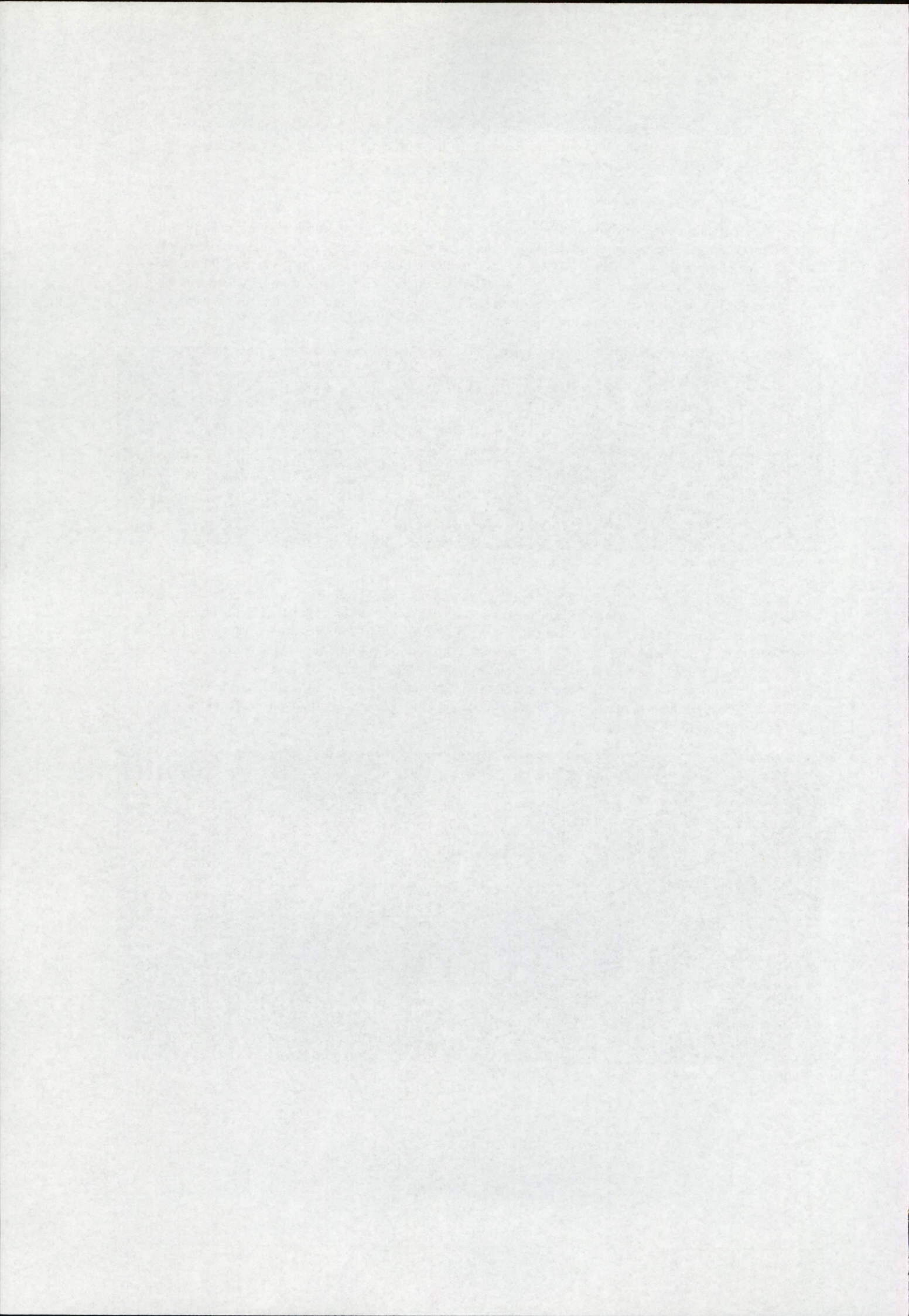
Figuur 1 Indeling van de DHM's van de terugvlucht.

In de volgende figuren is een hoogteprofiel over het golfpatroon weergegeven. Hieruit kan worden opgemaakt dat het patroon op deze locatie een golflengte heeft variërend tussen de 50 en 150 meter. Het is redelijk het wateroppervlak op een dergelijke afstand van 400 meter als een plat vlak te veronderstellen. De spreiding van de hoogtemetingen op deze profiellijn is 5 cm en is een schatting voor de grootteorde van het patroon. Dergelijke hoogteprofielen op andere locaties leveren schattingen van de hoogte van 5 tot 10 cm. Het feit dat dit golfpatroon vrijwel overal loodrecht op de vliegrichting staat, een variabele golflengte heeft, duidelijker is in de bochten en met name in de buitenbochten, levert sterke aanwijzingen dat de oorzaak in het lasersysteem of -platform moet worden gezocht.

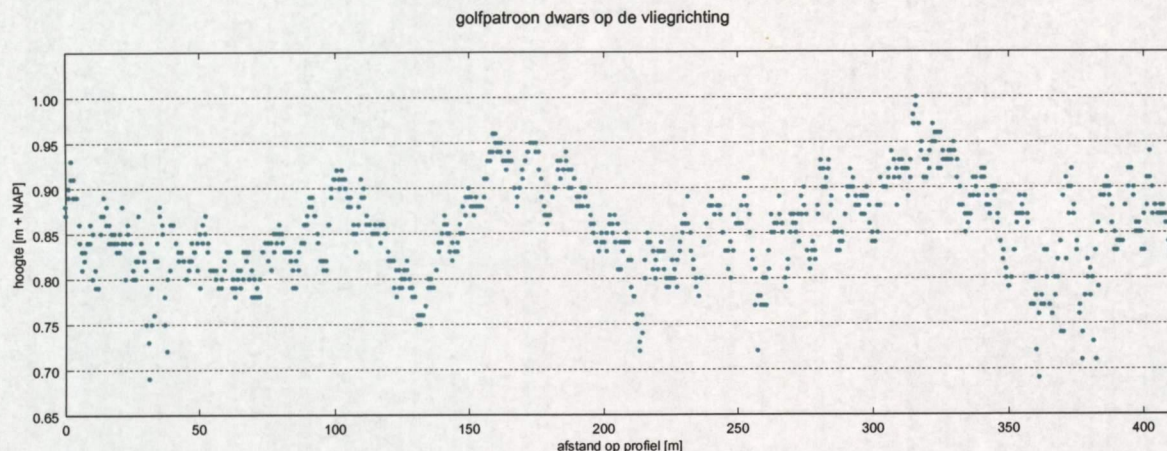


Figuur 2 Ligging van hoogteprofiel over golfpatroon









De leverancier heeft dit bevestigd na op diverse plaatsen langs het traject de metingen te hebben geanalyseerd. Als verklaring voor dit fenomeen worden kleine meetfouten in de zogenaamde 'roll-angle' (de beweging van het platform om de vlieg-as heen) genoemd, waardoor fouten in positie en hoogteberekening optreden. De fouten zouden optreden bij een roll-angle van 10 graden/sec of meer, wat verklaart dat in de bochten het effect duidelijker te zien is. De leverancier verklaarde dat de gevonden afwijkingen binnen de grenzen van het gebruikte dynamisch plaatsbepalingssysteem (kinematic dGPS) liggen.

Bovendien werd bevestigd dat de fouten een tilhoek van het wateroppervlak loodrecht op de as van de rivier kan veroorzaken van 10 cm. Het grootste gedeelte van de gegevens ligt hiermee binnen de gestelde eis van 10 cm standaarddeviatie in de afwijkingen, behalve in scherpe bochten in de vluchtlijn. Dit laatste komt niet persé overeen met de bochten in de rivier, want deze zijn groot genoeg om vloeiend met een helikopter te kunnen volgen. Het gaat hier met name om kleine schommelingen in de koers van de helikopter, die wellicht minder zouden zijn bij gebruik van een vliegtuig.

Wanneer uit hoogteprofielen het dwarsverhang van de rivier geschat moet worden dient rekening gehouden te worden met het hierboven beschreven effect. Het probleem kan opgelost worden door de hoogtewaarden te middelen over een afstand van minimaal 150-200 meter evenwijdig aan de rivieras.

### 3.3 Beschrijving eindproducten

Hieronder worden de in 1.3 gedefinieerde eindresultaten nader beschreven.

#### 3.3.1 Ruwe laseraltimetriegegevens

De oorspronkelijke meetdichtheid van het gehele gebied bedroeg 20 tot 30 punten per  $m^2$ . Omdat dit onhandelbare en onnodig grote bestanden oplevert is de puntendichtheid door de leverancier teruggebracht naar 1 punt per  $m^2$  door selectie van het laagste punt. Het punt is toegewezen aan het midden van de vierkante meter, zodat de punten op een regelmatig raster van 1 bij 1 meter liggen. Deze geleverde 'ruwe' puntenbestanden zijn dus niet de oorspronkelijke metingen, maar een afgeleide hiervan. We spreken in dit verslag toch van ruwe laseraltimetriegegevens, omdat deze punten de oorspronkelijke metingen het dichtst benaderen en als basis voor de Digitale Hoogte Modellen (DHM) is gebruikt.

De bestanden bestaan uit 3 kolommen met x-, y- en z-coördinaten in meters ten opzichte van RD/NAP. De z-coördinaten zijn afgerond op hele centimeters.

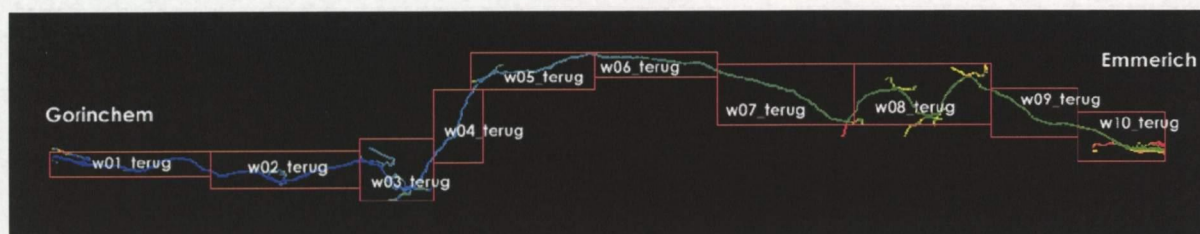
#### 3.3.2 Afgeleide Digitale Hoogte Modellen

Van de terugvlucht is een Digitale Hoogte Model (DHM) gemaakt in ARC/INFO gridformat, ten behoeve van verwerking in een GIS. Hierbij is het in 2.4.1 beschreven puntenbestand direct gekoppeld aan een regelmatig raster en zijn puntenbestand en DHM in wezen hetzelfde. Het DHM is echter eenvoudiger te bewerken en visualiseren. Om het DHM hanteerbaar te maken is de Waal van west naar oost in 10 zo recht mogelijke delen opgesplitst. Eenheid van de hoogtewaarden in de DHM's is meters ten opzichte van NAP.





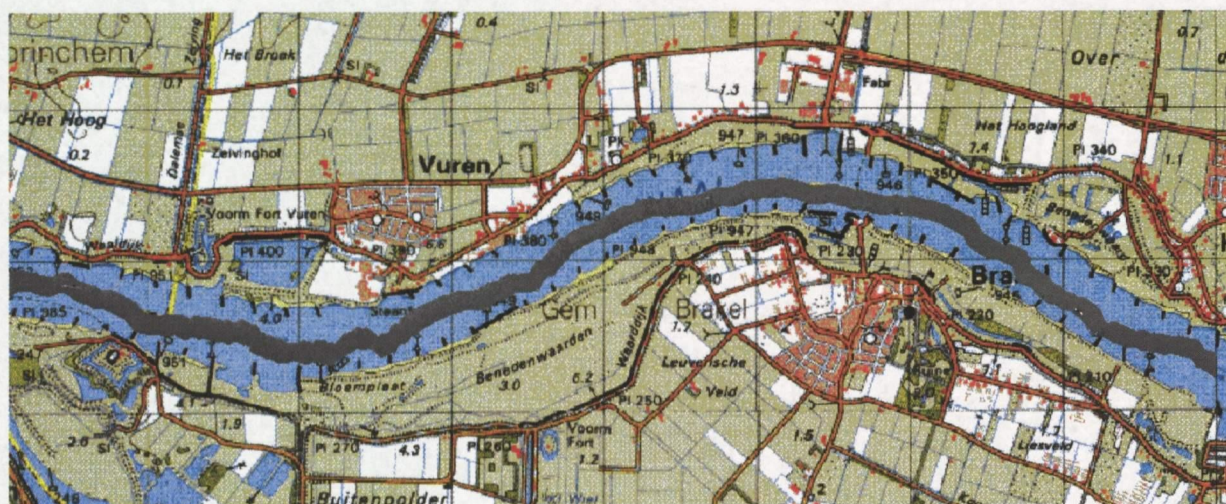




Figuur 4 Indeling van de DHM's van de terugvlucht.

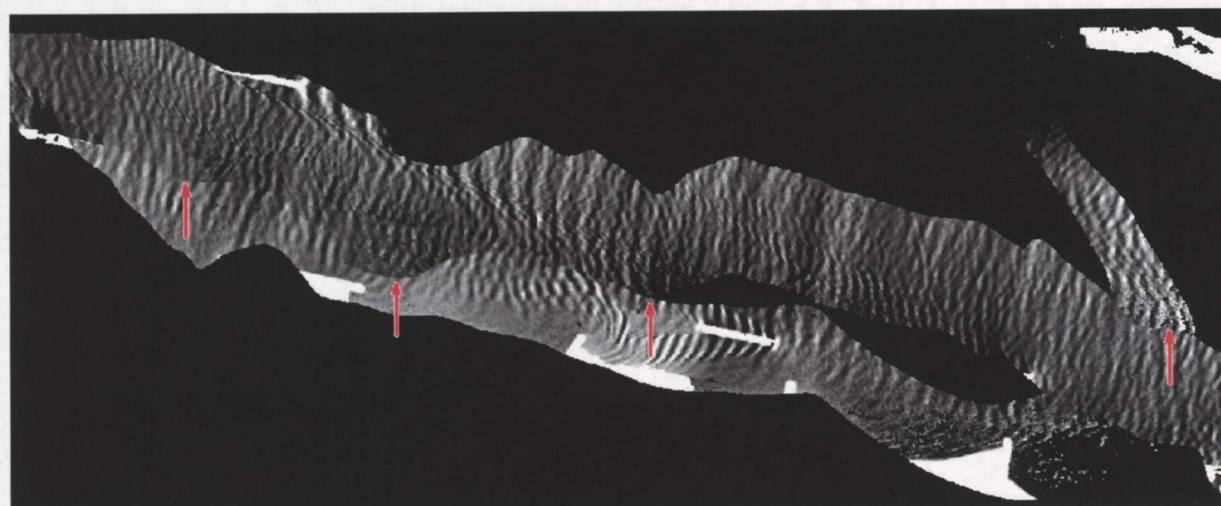
Hieronder worden enkele kenmerken beschreven die de aard van laseraltimetriemetingen in het algemeen en die van deze toepassing in het bijzonder illustreren. Hiermee kan een beter beeld worden verkregen van de (on)mogelijkheden van de techniek en als handleiding dienen voor verdere analyse van de gegevens.

De onderstaande figuur geeft een indruk van de bedekking van het zomerbed door de laseraltimetriemetingen. De strookbreedte is constant over de lengte van de Waal en bedraagt 200 meter, behalve op enkele plaatsen waar de vluchtstrook zichzelf kruist of gedeeltelijk overlapt.



Figuur 5 Breedte van de strook met hoogtegegevens ten opzichte van het zomerbed.

Enige voorzichtigheid is geboden op deze locaties waarbij overlap van de vluchtstroken aanwezig is, bijvoorbeeld bij Gorinchem (figuur 6), waar de helikopter verschillende keren op en neer heeft gevlogen. Hier zijn de verschillende hoogtemetingen van het zelfde gebied samengevoegd. De minimale verschillen in waterstand door o.a. wind- en boeggolven is zichtbaar, zoals bijvoorbeeld in de onderstaande figuur.



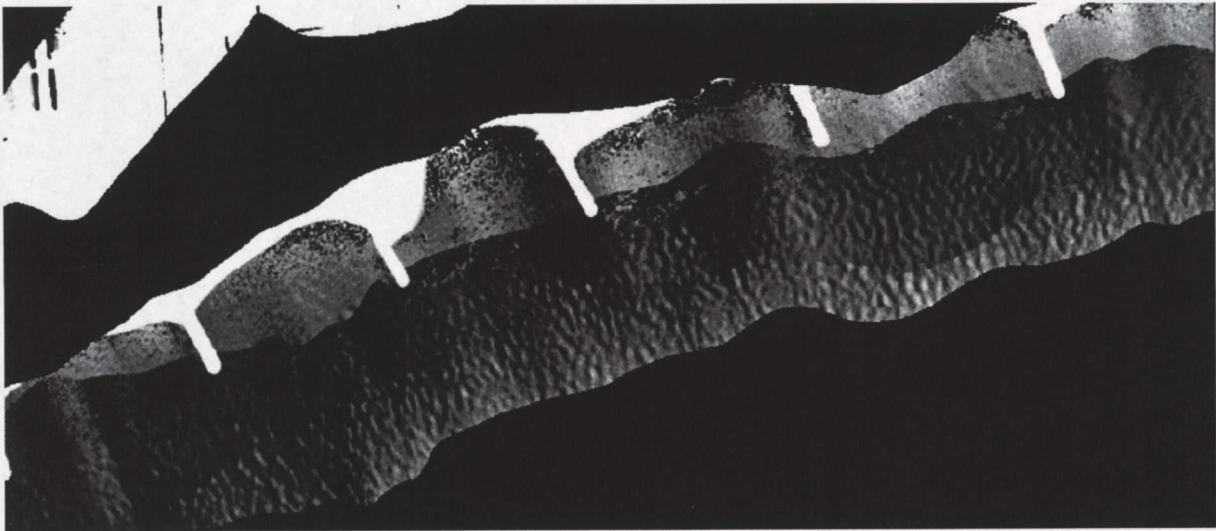
Figuur 6 Overlappende stroken zichtbaar door minimale hoogteverschillen (nabij Gorinchem).







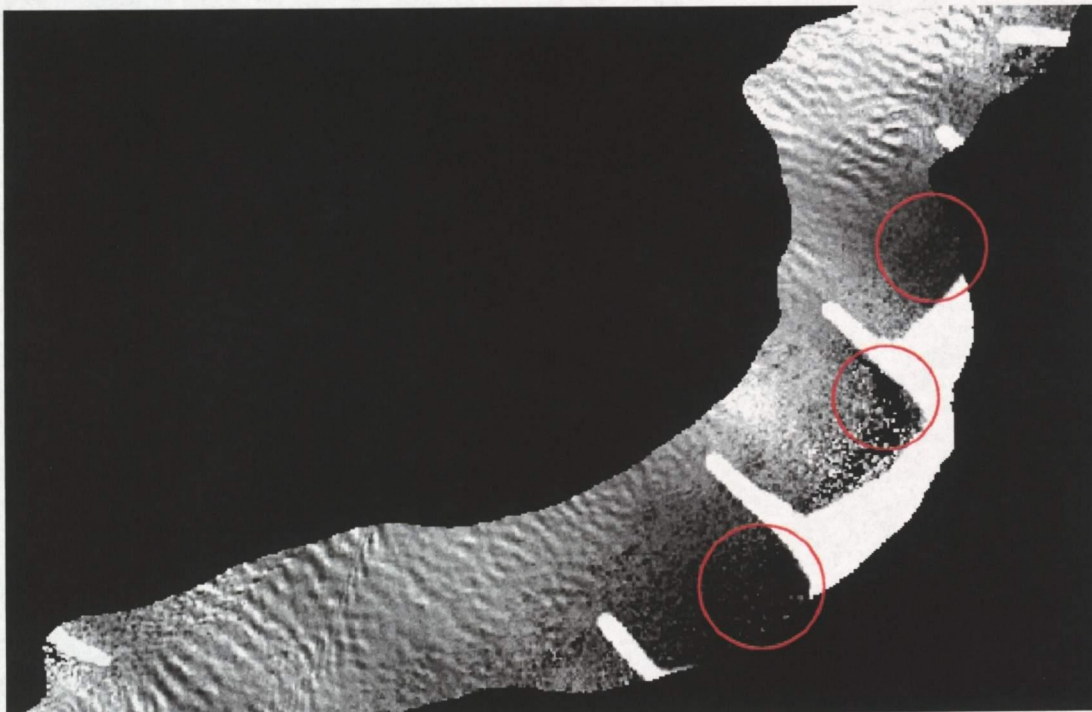
In een tweede voorbeeld, op de noordoever tussen Vuren en Brakel, wordt de suggestie gewekt dat hier sprake is van verhoging van de waterstand tussen de kribben. Ook hier is het hoogteverschil, maximaal 1 decimeter, veroorzaakt door het samenvoegen van 2 metingen in het zelfde gebied.



Figuur 7 Overlappende stroken zichtbaar door minimale hoogteverschillen (tussen Vuren en Brakel).

De grijs tinten in deze twee voorbeelden zijn zo gekozen dat het effect zeer duidelijk wordt weergegeven.

Als gevolg van een minder ruw wateroppervlak tussen de kribben werkt het water op de rustige delen tegen de oever als een spiegel. Hierdoor is de meetdichtheid in de hoeken van de kribvakken vaak lager of zijn metingen geheel afwezig (figuur 8)



Figuur 8 Verminderde meetdichtheid in kribvakken door spiegelwerking wateroppervlak.



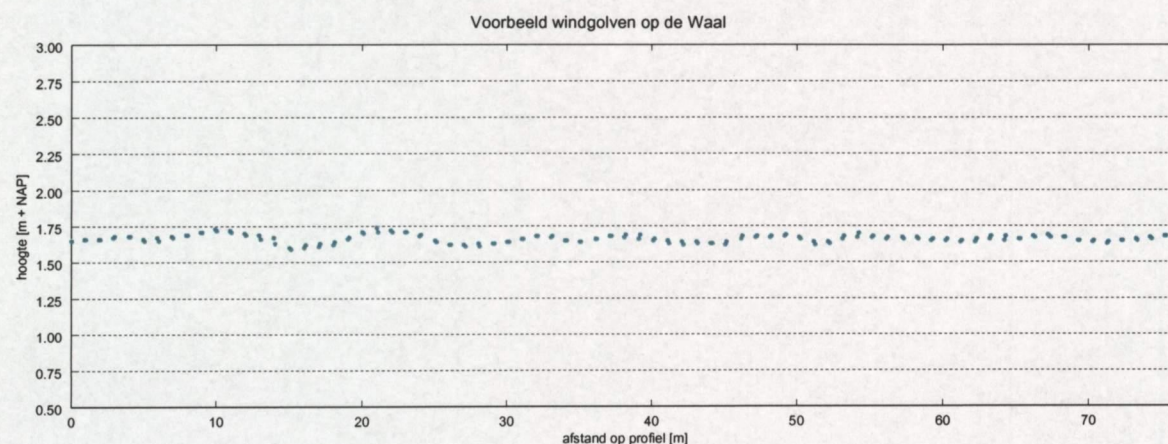
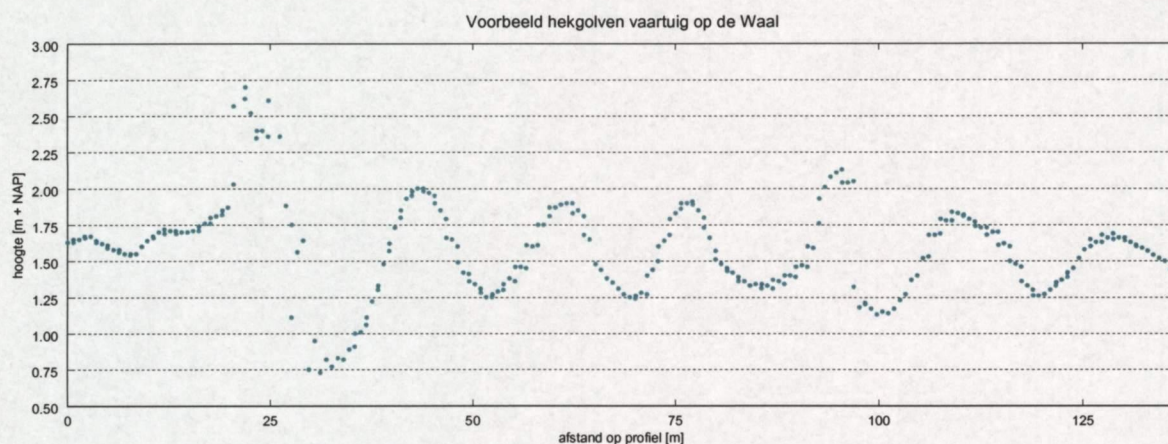




Aan de hand van grafieken als de volgende twee is een schatting gemaakt van de dimensies van de golven die duidelijk zichtbaar zijn op het wateroppervlak. De bovenste grafiek is het hoogteprofiel dwars op de hekgolven van een vaartuig. Golfhoogte en -lengte vlak bij het vaartuig zijn respectievelijk 0.75 en 20 meter.

Schatting van windgolven is niet geheel betrouwbaar, omdat over de breedte slechts een deel van de rivier door het laserDHM wordt bedekt en daardoor niet altijd duidelijk zichtbaar is of schepen in de buurt zijn (geweest). Geschatte maximale golfhoogte en -lengte in het voorbeeld van de tweede grafiek zijn respectievelijk 0.15 en 10 meter.

Een schatting van windrichting uit de zichtbare golfpatronen lijkt niet erg betrouwbaar vanwege de invloed van scheepsgolven die bijna overal zichtbaar zijn.

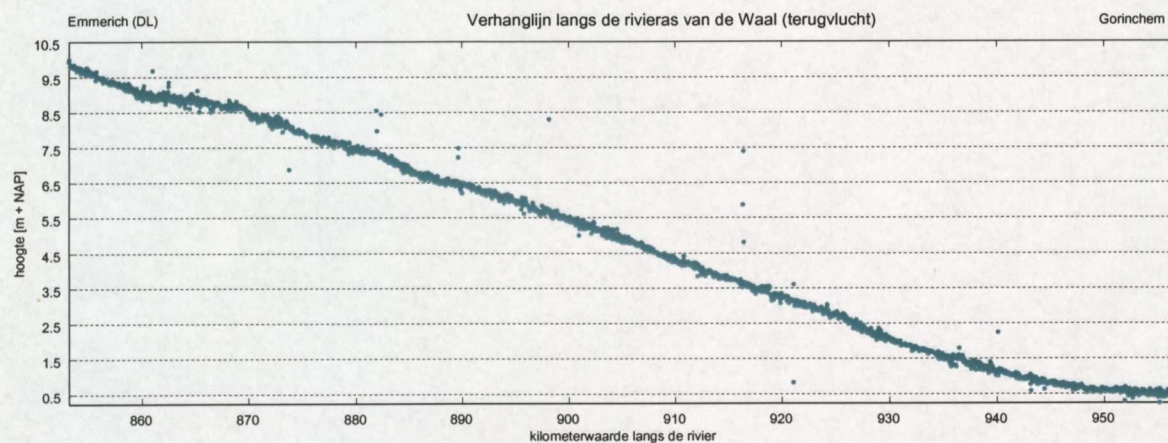




### 3.3.3 Verhanglijn

Er is op eenvoudige wijze een verhanglijn van de Waal uit de metingen van de terugvlucht geconstrueerd. Deze verhanglijn is een hoogteprofiel langs de as van de rivier, waarbij om de 50 meter de dichtstbijzijnde lasermeting loodrecht is geprojecteerd op de rivieras.

Voor ieder punt op het hoogteprofiel is de waarde van de kilometercodering uit de rivierkaart berekend. Hierbij is gebruik gemaakt van de bruggen van Emmerich en Gorinchem die in het hoogteprofiel duidelijk zichtbaar zijn en waarvan de kilometerwaarde bekend is.



Het bestand met de verhanglijn bevat 5 kolommen met achtereenvolgens, x-, y- en z-coördinaten in meters ten opzichte van RD/NAP, afstand op deprofiellijn in meters (Gorinchem is 0 m) en de kilometerwaarde.



## 4 Conclusies, aanbevelingen en discussie

Hieronder worden de conclusies uit deze studie kort samengevat. Aanbevelingen en discussiepunten zijn niet allemaal in voorgaande hoofdstukken besproken.

### 4.1 Betreffende kwaliteit

De precisie van de laseraltimetriemetingen voldoet aan de gestelde eis van maximaal 10 cm standaarddeviatie van de verschillen met controlemetingen in het veld (§3.2.1).

Beperkingen in de precisie waarmee de bewegingen van de helikopter loodrecht op de vliegrichting kon worden geregistreerd heeft echter geleid tot een golfpatroon dat zichtbaar is op het wateroppervlak. Het golfpatroon is het meest uitgesproken bij scherpe bochten in de vluchtlijn en kan tot een scheefstelling van ruim 10 cm over de breedte van de strook met hoogtedata leiden (§3.2.2).

### 4.2 Betreffende bepalen momentane verhanglijn Waal

Het is zeer eenvoudig een verhanglijn langs de as van de rivier af te leiden uit de hoogtemetingen verkregen met laseraltimetrie. Door de in §3.2.2 beschreven verstoringen kan dwarsverhang echter niet direct in de DHM's worden gemeten, maar dient de hoogte over een traject van minimaal 200 meter evenwijdig aan de rivieras te worden gemiddeld (§3.3.3).

### 4.3 Betreffende aard van het gebruikte lasersysteem

De behaalde strookbreedte van 200 meter lijkt het maximaal haalbare, ook gezien ervaringen met de reflectie van andere laseraltimeters op water (§3.3.2). Het is hierdoor niet mogelijk een dekkend hoogtemodel van het wateroppervlak te produceren dat loopt tot aan beide oevers. Dit zou kunnen worden opgelost door korte gedeelten van de rivier, bijvoorbeeld enkele kilometers met evenwijdige vluchtstroken te bedekken. Hierbij zullen de verschillende stroken waarneembaar zijn door scheepsgolven en het in §3.2.2 beschreven golfpatroon. Wanneer echter niet naar lokale verschillen (orde van tientallen meters) in de waterstand hoeft worden gekeken is dit een haalbare meetopzet. De keuze voor een vliegtuig als platform en het toepassen van een strookvereffeningsprocedure voor het minimaliseren van de verschillen in de strookoverlap verdient bij een dergelijke aanpak de voorkeur.

### 4.4 Betreffende overige gebruiksmogelijkheden in het rivierengebied

De in deze pilotstudie gepresenteerde toepassing van laseraltimetrie was relatief nieuw en specifiek voor het vaststellen van een Bagger Referentie Vlak. Het verdient de aanbeveling de behoeften aan hoogte-informatie in het rivierengebied integraal op te lossen waar mogelijk. Mogelijke taken van RWS in het rivierengebied waarbij laseraltimetrie basisinformatie zou kunnen leveren zijn bijvoorbeeld het vastleggen van oeverlijnen, het inventariseren van geometrische objecten (kribben, kades, dijken) en DHM productie voor het gehele winterbed ten behoeve van hydraulische modellen en schematisatie. Hiermee kunnen de kosten ten opzichte van reeds beschikbare methoden (bijvoorbeeld vaartuigmetingen), meetinspanning (inschakelen marktpartijen) en de meerwaarde van laseraltimetrie (bijvoorbeeld de hoge punt dichtheid) worden gerechtvaardigd. Voor bijvoorbeeld alleen het bepalen van een verhanglijn van de Waal is bij deze meting veel meer gemeten dan nodig is.

De rol van het basisbestand Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) zal bij een dergelijke integrale oplossing mede moeten worden onderzocht.





Dit is een minder milieu belastende inbindmap

Deze BINDOMATIC ECO-map bestaat uit een achterzijde van recycled karton en een voorzijde van PVC-vrije folie.

● chloor-arm ● zwavelvrij ● onschadelijk in de vuilverbranding ● niet van invloed op de kwaliteit van het grond- en oppervlakte water



